

〈制冷技术〉

HOT 器件用微型线性分置式斯特林制冷机

罗 云, 陈 军, 黄 伟, 李家鹏, 朱正荣, 黄恩和, 黄 蓉, 周凡钦, 饶永兴
毕 翔, 杨金清

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 针对第三代高工作温度 (HOT) 红外探测器在手持设备、狙击步枪及无人机等小型化、轻载荷热成像平台的应用需求, 本研究聚焦于满足低功耗、低重量、小尺寸、低成本及快速启动 (SWaP-C) 特性的微型低温制冷机研制。基于此, 昆明物理研究所开发了面向 HOT 器件的微型低功耗线性斯特林制冷机, 采用百赫兹线性谐振压缩机与阶梯轴气动膨胀机技术。通过多轮优化迭代设计, 成功研制出 C351 型斯特林制冷机, 并系统评估了其制冷性能。实验结果表明: 该制冷机匹配 640×512 像元 HOT 中波红外探测器时, 在 150K 工作温度下控温功耗低于 2W (环境温度 23°C , 热负载 $180\text{mW}@77\text{K}$), 降温时间小于 90s , 整机重量仅 217g (含 12g 驱动控制电路)。性能测试验证了其在 SWaP-C 指标上的先进性, 目前已完成小批量生产工艺验证, 具备工程化应用条件。

关键词: HOT 器件; 线性斯特林; 低温制冷机; SWaP-C; 制冷性能

中图分类号: TB661 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2025)04-0517-06

Micro Linear Stirling Cooler for HOT IR Detectors

LUO Yun, CHEN Jun, HUANG Wei, LI Jiapeng, ZHU Zhengrong, HUANG Enhe,
HUANG Rong, ZHOU Fanqin, RAO Yongxing, BI Xiang, YANG Jinqing
(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: In response to the demand for low-power, small-size, lightweight, low-cost, high-performance, and fast-cooling cryogenic coolers for use with high-performance infrared detectors on light-load platforms such as hand-held thermal imagers and UAVs, Kunming Institute of Physics (K.I.P) has developed micro linear coolers for higher operating temperature (HOT) IR detectors. The linear resonant compressor was studied to operate at 100 Hz to increase power density. Simultaneously, a pneumatic expansion design incorporating a back pressure chamber was achieved. After multiple rounds of optimization and iterative design, the development of the C351 cooler was completed. Performance system tests verified the advancement of the indicators, and the cooler has reached small-batch production capacity. The performance of the matching 640×512 HOT medium-wave infrared detector includes power consumption of less than 2 W (thermal load $180\text{mW}@77\text{K}@23^\circ\text{C}$), cooling time of less than 90 s , and a cooler weight of 217 g (drive control circuit: 12 g).

Key words: HOT IR detectors, linear stirling, cooler, SWaP-C, performance

0 引言

近年来, 红外探测器在民用和商用领域的应用范围持续扩大, 涵盖气体污染物监测、森林防火、气象监测及天文观测等多个重要领域。与军用系统不同,

民用场景对探测器的成本、尺寸和功耗等指标具有更高的敏感性。尽管非制冷红外探测器因其结构简单、成本低廉而被广泛应用, 但其固有的动态响应速度慢、探测距离有限等性能局限, 严重制约了其在高端民用场景的应用。更关键的是, 通过优化材料或结构

收稿日期: 2023-10-18; 修订日期: 2025-04-07。

作者简介: 罗云 (1993-), 男, 云南曲靖人, 工程师, 博士研究生, 研究方向: 线性斯特林及脉管制冷机。E-mail:yunloyer@163.com。

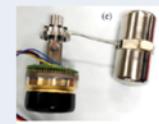
通信作者: 陈军 (1968-), 男, 上海奉贤人, 正高级工程师, 研究方向: 微型低温制冷机。E-mail:kipchj@163.com。

提升非制冷探测器性能往往会导致器件尺寸和成本呈指数级增长^[1]。第三代高工作温度（high operation temperature, HOT）红外探测器的快速发展为这一问题的解决提供了新思路。HOT探测器凭借其小型化、轻量化、低功耗和高可靠性等优势，成为民用红外应用的理想选择。HOT技术路线为制冷机系统带来了显著的性能优化空间，如热力学本征效率提升、热负载降低、功耗降低、功率密度提升、整机尺寸和重量降低，将更利于高性能的HOT红外探测器件的研制。

21世纪初至今，红外探测器技术经历了从传统低温（77 K）向高工作温度（HOT, 150~200 K）的范式转变，同时像元间距从30 μm缩减至10 μm量级。这一技术演进直接推动了微型低温制冷机向小尺寸、轻量化、高效能和低成本方向发展。2007年以来，全球主要科研机构相继推出适配HOT器件的微型制冷机解决方案，其中线性分置式斯特林制冷机因其效率

高、可靠性强和结构紧凑等优势，成为主流技术路线。典型代表（如表1所示）包括：法国Thales公司的UP8197、美国L3公司的L200，美国DRS公司的MicroCooler、以色列Ricor公司的K588及K590，德国AIM公司的MCC025及SX020，美国FLIR公司的FL-100^[2]，这些商用机型普遍采用模块化设计，在100~200 K温区可提供0.5~1.5 W制冷量，且随着探测器工作温度持续升高（最新研究达210 K），制冷机呈现显著微型化趋势。值得关注的是，以色列Veprik团队^[3]通过技术创新实现了突破性进展，其采用不易泄漏的新制冷工质替代氦气，低成本的微纤维蓄冷器填料，动磁式直线电机与电磁弹簧的气动膨胀机等新兴技术，研制一台新概念的制冷机，匹配一只漏热量为200 mW的杜瓦控温功耗仅1.4 W ac@150 K, 2.5 W ac@125 K，整机重量仅140 g，并已进行了11000 h的可靠性验证。

表1 国外HOT器件用微型斯特林制冷机
Table 1 Micro Stirling cryocooler for foreign HOT devices

Company	DRS	Cobham	FLIR	THALES	AIM	Ricor
Product diagrams						
Product model	MicroCooler	LC1076	FL-100	UP8197	MCC025	K588
Temperature/ K	160	140	150	150	120-160	150
Compressor dimensions/mm	φ30×53	φ28.2×53.6	φ31×67	φ30×62	φ27.5×62	φ26×52
Cold finger diameter/mm	φ4.7	φ4.7	φ6.6	φ6.6	φ6	φ6.6
Cooling capacity/W	0.5 W@160 K @23°C	0.4 W@120 K @23°C	1.3 W@150 K @23°C	1.1 W@150 K @23°C	0.5 W@150 K @71°C	0.55 W@150 K @71°C
Weight/g	237	260	262	250	240	200

本文报道了昆明物理研究所针对高工作温度（HOT）红外探测器开发的新型微型线性分置式斯特林制冷机。对标国外先进水平，通过采用高功率密度压缩机设计、提升运行频率、优化充气压力，实现制冷量>1 W@150 K，降温时间<90 s，重量<230 g的系统级性能指标突破。

1 制冷机结构设计

线性分置式斯特林制冷机凭借其固有损耗低、可靠性高、振动抑制能力强及布局灵活等特点，在高工作温度条件下展现出卓越的制冷效率及应用优势。为满足新一代HOT红外探测器对微型化与轻量化的严苛要求，本研究提出了一种紧凑的结构设计（图1），

由压缩机及膨胀机组成。压缩机由动磁式直线电机驱动,结构紧凑、电机效率高,对置式活塞的布局,很大程度消减了压缩机自激微振动,活塞涂覆有机耐磨材料提高运动摩擦副的耐磨及润滑特性。运动的活塞压缩氦气工质产生压力波,经由分置管传输至膨胀机,在膨胀机端驱动排出器运动,工质在膨胀腔等温膨胀做功产生制冷效应。制冷机的结构尺寸及运行参数决定着由弹簧-质量-阻尼组成的谐振系统状态,同时决定着质量流与压力波的相位关系,合理的参数设计使压缩机声功转换效率提高,回热器损失降低,相

位关系最佳,整机制冷性能达到最大。

制冷机热力学参数设计采用美国公司开发的专业热力学仿真计算软件 SAGE,通过模块化建立一维整机模型,利用经验系数弥补实际运行的多维效应,从而提高模型的准确性。SAGE 模型如图 2 所示,包括直线电机、压缩及膨胀活塞-质量-弹簧-阻尼系统、各容积腔体、蓄冷器等,各模块通过质量流、压力波及热流连接,模拟实际的气流、热流传递。以声功转换效率、声功率效率、电机效率等指标组成评价体系,设计制冷机的结构尺寸及运行参数。

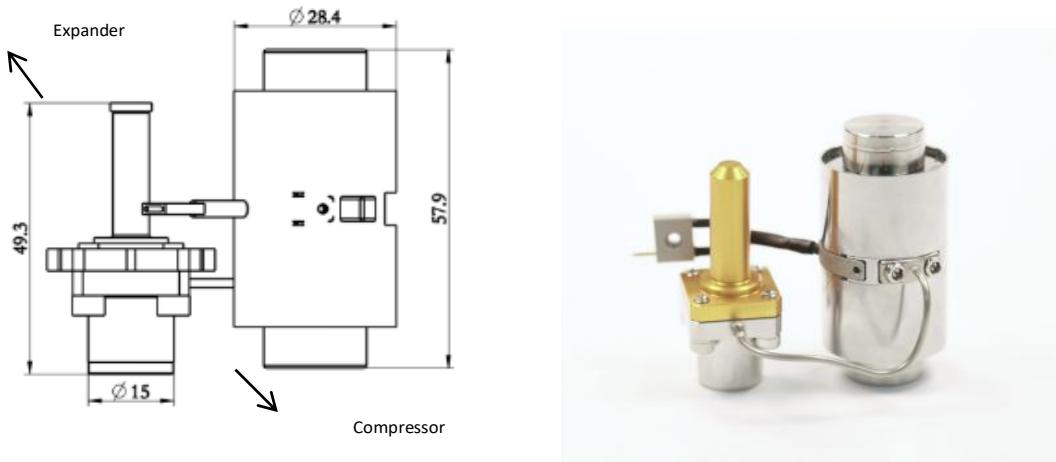


图 1 昆明物理研究所 HOT 器件用微型线性分置式斯特林制冷机

Fig.1 Miniature linear split Stirling cryocooler for HOT IR sensors of KIP

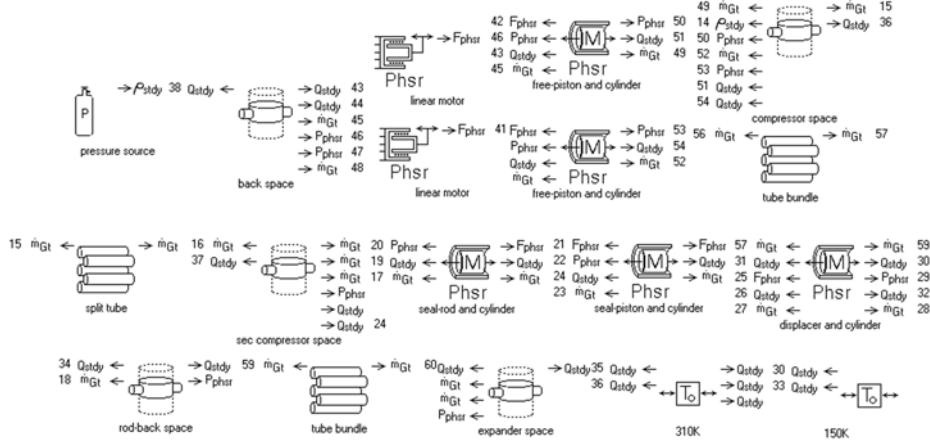


图 2 线性斯特林制冷机的热力学模型

Fig.2 Thermodynamic modeling of linear Stirling cryocoolers

2 频率及充气压力参数设计

线性压缩机振子部件通过直线电机驱动产生往复运动,其运行频率和充气压力共同决定了压缩机的最大输入功率和声功转换效率,同时充气压力还直接影响气动膨胀机的驱动力。通过参数优化使系统达到

谐振状态,驱动力可实现翻倍的做功能力,从而显著提升制冷性能。实验研究表明,提高运行频率和充气压力可在相同输入声功条件下减小扫气容积,降低关键部件尺寸,是实现制冷机轻量化设计的有效途径。本机型采用百赫兹级线性压缩机技术,结合高制冷温区的热力学效率优势,研制微型化斯特林制冷机。

如图3所示,随着频率增加,制冷量在120 Hz时达到峰值1.5 W@150 K,并在±10 Hz范围内保持90%以上的性能。充气压力升高会增强气体弹簧刚度,使谐振频率从110 Hz提升至125 Hz。同时,降温时间在谐振点处最短,而最大输入功率随充气压力和频率的提高而增加,在35 bar/120 Hz工况下达到33 W ac,功率密度提升至35 mW/g。

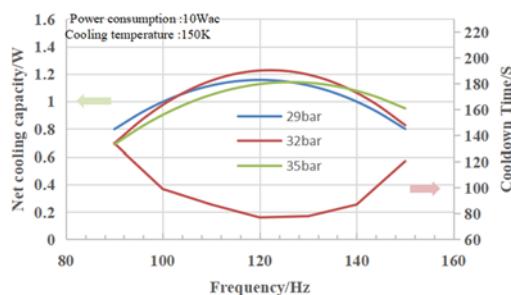


图3 运行频率及充气压力对制冷性能的影响

Fig.3 The influence of operating frequency and charge pressure on performance

3 回热器设计

回热器的结构特性和热物性是回热器换热效率的决定性因素,其主要影响填料与工质间的传热特性和流动阻力特性,从而影响制冷机的制冷性能。回热器的设计需考虑填料的比热容、热扩散率、热渗透深度、孔隙率、水力直径和长径比等,其回热器效率还与制冷温区、工作频率、充气压力、冷量需求相关。随着制冷机运行频率的提升,回热器两端相位角增大,质量流增大,回热器损失增大,提高充气压力,减小回热器尺寸可降低损失。同时频率的提升还将导致氦气的热渗透深度变小,为了保证回热器换热充分,回热器填料水力直径需小于氦气的热渗透深度,所以选用了500目的不锈钢丝网作为回热器填料。

基于Regen软件进行高效回热器设计,设定运行频率120 Hz,充气压力3.2 MPa,制冷温度150 K,冷

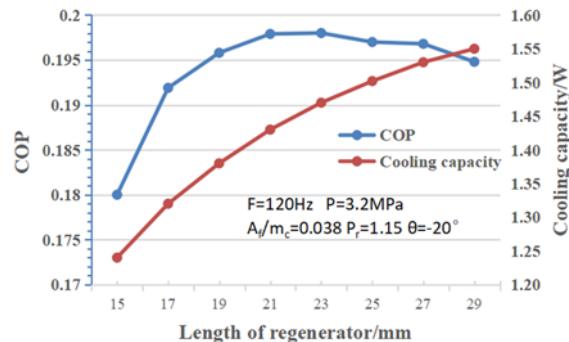


图4 回热器性能随回热器长度变化曲线

Fig.4 Influence of the regenerator length on performance

端相位角为-20°,热端温度为80 K,冷端压比1.16,采用500目不锈钢丝网,孔隙率为0.607,水力直径为39.2 μm。模拟回热器长度对制冷性能的影响如图4所示,随着回热器长度的增加,回热器的效率先增加后减小,当回热器长度为23 mm时,回热器效率最高为19.8%,制冷量为1.47 W; A_f/m_c (气体流通截面积与冷端质量流比值)对回热器性能影响如图5所示,随着 A_f/m_c 增加,回热器效率先增后减,制冷量逐渐减少, A_f/m_c 值为0.09时,最大COP为23.9%,综合考虑最大制冷量及实际使用负载情况,确定横截面积为 $2.3 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ 。由确定的运行参数及结构尺寸工况模拟结果可知,由于回热器的流动阻力,压比从热端的1.19降至1.16,容积效应造成冷热端质量流相位角差值为39°,压力波跨越冷指的相位角滞后了0.9°,此时回热器损失为0.187 W,制冷量为1 W, COP为23.6%,相位分布基本符合回热器损失最小的设计目标。

4 驱动控制器设计

驱动控制器的设计如图6所示,基于数字化、小型化、高效化、通用化的设计准则,电路整版元件布局均匀合理,大小为28 mm×28 mm,重量12 g,连接器选用了高可靠性的无螺钉榫接6-Pin连接器,可通过手指按压对特定方向施力轻松插拔。针对高效率、低损耗做了专门设计,电路可靠性高。内部接口支持标准RS232协议,可通过串口对驱动电路做两种初始化设定:第一种是控温点预设模式,第二种是功率预设模式,为用户在不同应用需求下提供更多预设选择。驱动电路支持最低5 V,最高18 V的电源输入,最大输出功耗15 W,同时在12 V输入电压标准使用状态下电路静态功耗小于0.3 W。极低的5 V输入阈值、极高的效率、小体积小重量的优势使该电路在小型手持级高温器件装备应用具备优势。

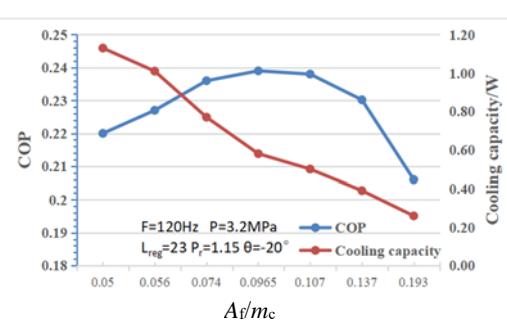


图5 回热器性能随 A_f/m_c 变化曲线

Fig.5 Influence of A_f/m_c on performances

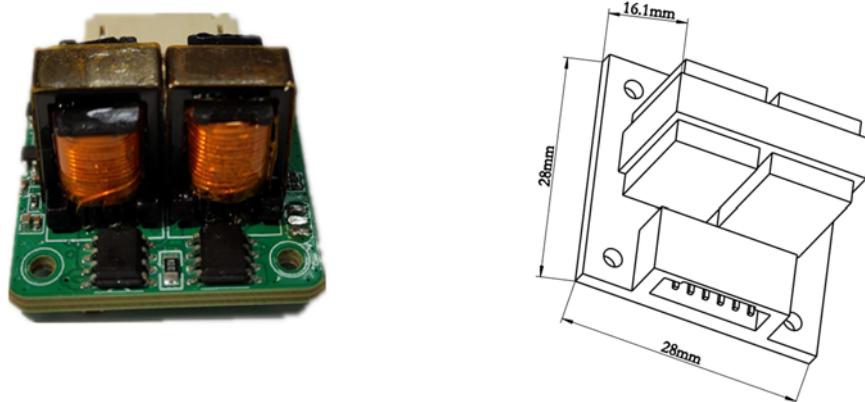


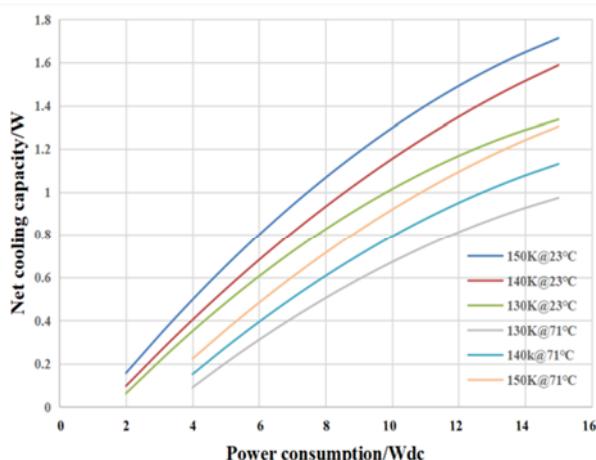
图 6 驱动控制器

Fig.6 The driven controller

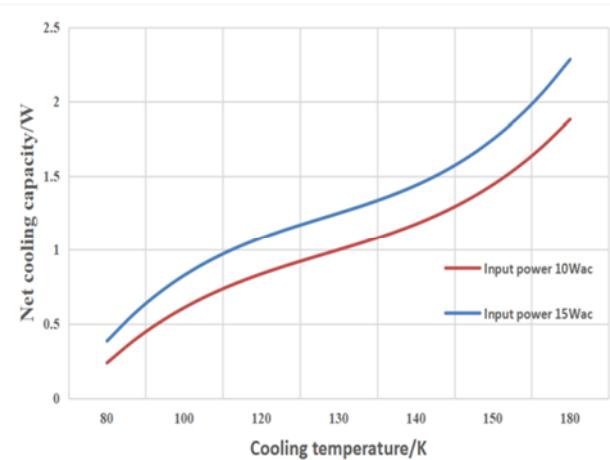
5 制冷机性能测试

实验研究制冷机匹配静态真空杜瓦, 模拟 640×512 红外探测器组件, 通过热电阻替代芯片位置并外接可调热负载进行制冷性能测试, 测得杜瓦静态热负载为 190 mW@77K , 测试系统配备专用工装^[4]。实验结果如图 7 所示, 当输入功率为 10 W ac 时, 制冷机可在 80 s 内从室温降至 150 K , 86 s 降至 140 K , 95 s 降至 130 K ; 在 15 W ac 输入功率下, 制冷机于 180 K 、 150 K 和 80 K 温区分别提供 2.3 W 、 1.7 W 和 416 mW 制冷量, 而 10 W ac 输入时 150 K 冷量达 1.34 W 。对比 23°C 与 70°C 环境测试数据, 高温工况下因充气压力变化及阻尼特性改变, 制冷量平均降低 300 mW 。

匹配的微型化数字驱动控制电路采用直流供电, 实验显示: 12 V 供电时最大电流 1.2 A (14.4 W dc), 70 s 内降温至 150 K , 稳态控温功耗 1.68 W dc (效率 74%), 增加 100 mW 负载后升至 2.16 W dc ; 9.5 V 供电时降温时间延长至 100 s , 但效率保持 75% (AC 端功耗 1.21 W ac)。输入电压变化 ($9.5 \sim 12 \text{ V}$) 对控制器效率影响小于 2% , 验证了制冷机在匹配 150 K HOT 器件时的优异性能——降温时间 $\leq 100 \text{ s}$ 、控温功耗 $\leq 2.2 \text{ W dc}$, 且具备良好的环境适应性 ($23^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$)。所有测试数据均通过 6 位半数字万用表采集 (不确定度 $< 0.1\%$), 热负载校准精度 $\pm 1 \text{ mW}$ 。



(a) 制冷量与输入功率的关系
(a) Cooling capacity vs. power consumption



(b) 制冷量与制冷温度的关系
(b) Cooling capacity vs. refrigeration temperature

图 7 C351 制冷机性能曲线

Fig.7 The performance curves of C351 cooler

为验证制冷机可靠性,2022年开展了4台制冷机的加速寿命试验,制冷机运行在稳态控温状态,环境条件为70℃,23℃,−40℃,一个24 h周期内各运行7 h,温度转换时间1 h,温度转换期间完成开关机实验。除一台在100 h左右早期失效外,其他3台运行至今MTTF平均为15000 h。

6 结论

本研究基于高工作温度(HOT)红外探测器对短光轴、低功耗及快速降温的需求,采用百赫兹级线性谐振压缩机与阶梯轴气动膨胀机技术,通过高频回热器优化设计、低阻尼工艺改进及运行参数匹配,成功研制出微型线性斯特林制冷机。实验表明:在15 W ac输入功率下,制冷机可实现80 K/416 mW、150 K/1.7 W及180 K/2.3 W的制冷量;10 W ac输入时仍能提供1.34 W@150 K的稳定冷量。该制冷机可适配128×128~1024×768面阵的中波HOT探测器,匹配器件时控温功耗<2 W(热负载180 mW@77 K@23℃),降温时间<90 s,整机重量仅217 g(含12 g驱动电路),综合性能优于国际同类产品。目前已在手持设备、无人机及新一代空空导弹等平台完成工程验证,并通过15000 h加速老化试验,MTTF达20 000 h,验证了其

高可靠性。此项研究为轻量化红外系统提供了关键技术支撑,并具备规模化生产能力。

参考文献:

- [1] 陈军,习中立,秦强,等.碲镉汞高温红外探测器组件进展[J].红外与激光工程,2022,52(1):20220462.
CHEN Jun, XI Zhongli, QIN Qiang, et al. Advance in high operating temperature HgCdTe infrared detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 52(1): 20220462.
- [2] 习中立,陈军,陈晓屏,等.HOT器件用自由活塞斯特林制冷机研究进展[J].真空与低温,2018,24(3):151-156.
XI Zhongli, CHEN Jun, CHEN Xiaoping, et al. Overview of free piston stirling cryocoolers for HOT detectors[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2018, 24(3): 151-156.
- [3] Veprik A, Zechter S, Refaeli R, et al. Affordable cryocoolers for commercial IR imaging[C]//Proc. of SPIE, Infrared Technology and Applications XLVII, 2021, 11741: 117410G.
- [4] 赵文丽,孙皓,李仁智,等.冷端测温位置对制冷机性能表现的影响[J].红外技术,2024,46(9):1087-1091.
ZHAO Wenli, SUN Hao, LI Renzhi, et al. Influence of temperature measuring position at the cold end on cryocooler performance[J]. *Infrared Technology*, 2024, 46(9): 1087-1091.